

多阳极 PMT 的串扰对四象限倾斜跟踪传感器跟踪精度的影响

马晓燮¹⁾²⁾ 郭友明¹⁾²⁾³⁾ 饶长辉^{1)2)†} 魏凯¹⁾²⁾ 田雨¹⁾²⁾ 饶学军¹⁾²⁾

1) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2012 年 6 月 15 日收到; 2012 年 7 月 7 日收到修改稿)

介绍了四象限倾斜跟踪传感器的原理后, 分析了存在光子噪声和串扰条件下的四象限探测器的质心探测误差和光斑位移灵敏度, 并推导了存在光子噪声和串扰条件下四象限倾斜跟踪传感器跟踪误差的理论公式, 最后通过实验证明了理论分析的正确性. 理论分析和实验的结果都表明: 当单帧光 - 电子数一定时, 串扰越大, 四象限倾斜跟踪传感器的跟踪误差越大; 而当串扰一定时, 单帧光 - 电子数越多, 四象限倾斜跟踪传感器的跟踪误差越小.

关键词: 光学工程, 跟踪传感器, 四象限探测器, 跟踪误差

PACS: 29.40.Gx, 06.60.Sx, 42.15.Eq

1 引言

在对点源目标的跟踪系统中, 通常会在成像透镜焦平面处放置四象限探测器探测焦面光斑质心的移动从而动态地解算出入射波前的倾斜量^[1,2], 成像透镜和四象限探测器就构成了四象限倾斜跟踪传感器. 当四象限倾斜跟踪系统用于天文观测或星-地通信等领域时^[3-6], 望远镜口径处接收到的光能仅有小部分能量用于倾斜跟踪, 其余大部分能量用于波前校正或成像, 因此要求倾斜跟踪传感器工作在光子计数模式下. 当采用多阳极光电倍增管作为四象限探测器时, 由于光电倍增管中阳极之间存在着串扰, 所以当单个通道接收到光子并在对应的阳极产生一个光 - 电脉冲时, 其余几个通道的阳极也会对应地产生一个脉冲幅度较小的电脉冲. 串扰的存在, 会严重干扰单个象限光子计数的准确性, 从而影响四象限探测器对焦平面光斑质心探测的精度. 目前国内外未见报道串扰对四象限倾斜跟踪传感器跟踪精度的影响文章, 因此十分必要

深入地讨论串扰是如何影响四象限跟踪传感器跟踪精度的.

2 四象限倾斜跟踪传感器的原理

如图 1 所示, 四象限倾斜跟踪传感器的工作原理是: 四象限探测器的光敏面放置在成像透镜的焦面处, 目标波前经成像透镜汇聚后在焦面上形成焦面光斑. 当入射波前的倾斜角改变时, 焦面光斑会在成像透镜的焦平面上移动, 从而改变四个光敏面上四个象限的光能量分布. 根据四象限探测器四个象限输出的光电子数, 利用质心计算公式, 可以计算出目标光斑质心偏移的方向, 从而解算出入射波前的倾斜方向.

通常情况下, 四象限探测器光敏面处光斑的光强呈高斯分布, 其分布函数如下:

$$I(x, y) = \frac{P_s}{2\pi G_s^2} \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{\sqrt{2}G_s} \right)^2 - \left(\frac{y - y_0}{\sqrt{2}G_s} \right)^2 \right], \quad (1)$$

† E-mail: chrhao@ioe.ac.cn

其中, P_s 是到达四象限探测器光敏面的总光子数; G_s 是光斑的高斯宽度; (x_0, y_0) 是光斑的质心位置坐标.

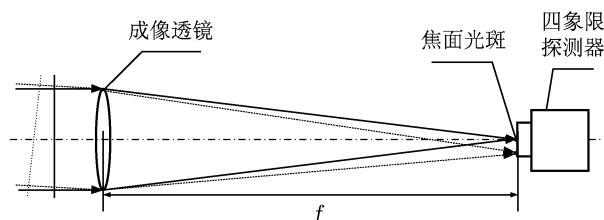


图1 四象限倾斜跟踪传感器的原理图

如图2所示, 当光斑的质心位置为 (x_0, y_0) , 并且四象限探测器单个象限的宽度为 ω , 总光子数为 P_s , 各象限输出的光-电子数为^[7]

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{E \cdot P_s}{4} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega - x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right] \\ &\quad \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega - y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right], \\ n_2 &= \frac{E \cdot P_s}{4} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega + x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right] \\ &\quad \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega - y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right], \\ n_3 &= \frac{E \cdot P_s}{4} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega + x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right] \\ &\quad \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega + y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right], \\ n_4 &= \frac{E \cdot P_s}{4} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega - x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right] \\ &\quad \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\omega + y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y_0}{\sqrt{2}G_s} \right) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

其中, E 是四象限探测器的量子效率; $\operatorname{erf}(\varepsilon)$ 是误差累计函数: $\operatorname{erf}(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\varepsilon e^{-t^2} dt$.

四象限探测器光敏面上光斑的质心 (x_c, y_c) 计算公式为

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{(N_1 + N_4) - (N_2 + N_3)}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4}, \\ y_c &= \frac{(N_1 + N_2) - (N_3 + N_4)}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中, N_i 表示四象限探测器的第 i 象限输出的光-电子个数.

在后面的叙述中, 我们称 (x_c, y_c) 为光斑质心计算值, 而 (x_0, y_0) 为光斑质心真实值.

光斑质心计算值 x_c 和 y_c 是一个无量纲的数, 所以需要定义一个位移系数 k_c , 当 x_c 和 y_c 处于线性区域内时, 需要通过光斑位移转换因子将计算得到的光斑质心位置 (x_c, y_c) 还原为光斑质心真实值 (x_0, y_0) , 因此, 入射波前在 x, y 两个方向上的倾斜角 α_x 和 α_y 的计算公式为 (α_x 和 α_y 都很小):

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \arctan \left(\frac{x_0}{f} \right) = \frac{k_c \cdot x_c}{f}, \\ \alpha_y &= \arctan \left(\frac{y_0}{f} \right) = \frac{k_c \cdot y_c}{f}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中, f 是四象限倾斜跟踪传感器的有效焦距, k_c 是光斑位移转换因子, $k_c(x_c) = x_0/x_c$.

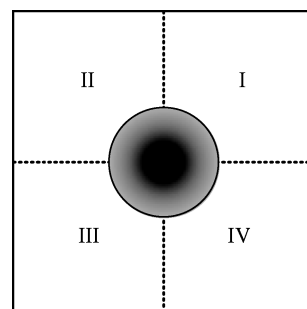


图2 光斑质心探测

3 多阳极光电倍增管中的串扰

光电倍增管通过多级倍增电极将光阴极产生的光-电子数放大, 最后在阳极处收集到的电子可增加 10^4 — 10^8 倍, 因此可以达到单光子探测的灵敏度. 多阳极光电倍增管是通过在空间上的特殊设计, 将多个光电倍增管集成在一个封装内, 不同引脚的输出信号与光阴极的空间位置对应. 所以 2×2 的多阳极光电倍增管可以看作是一个四象限探测器.

然而, 由于制作工艺的原因, 在多阳极光电倍增管的阳极处没有做屏蔽, 因此, 当多阳极光电倍增管工作在光子计数状态时, 由于极间电容的耦合作用, 当一个象限产生一个光-电脉冲时, 其余象限也会产生一个较小的电脉冲, 当串扰产生的小脉冲高于阈值电平后, 后端电路会认为是一个光-电脉冲, 从而产生一次伪光子计数.

根据串扰产生的原理, 我们可以定义两象限间

的串扰率为: 当第 i 象限产生 P_i 个真实的光 - 电子数时, 第 j 象限由于串扰产生 P_j 个伪光子计数, 则第 i 象限与第 j 象限之间的串扰率为

$$k_{ij} = \frac{P_j}{P_i}. \quad (5)$$

为了简化分析, 根据象限间的对称性, 我们可以认为相邻象限间的串扰率均为 k_c , 而相对的象限间的串扰率均为 k_s , 如图 3 所示.

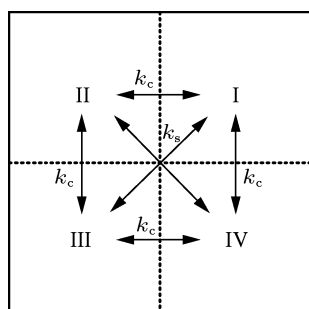


图 3 串扰分布示意图

所以, 当光斑在四象限探测器上移动时, 记录得到的光-电子向量 $N_C = [N_1, N_2, N_3, N_4]'$ 与光斑产生的真实光-电子向量 $n_s = [n_1, n_2, n_3, n_4]'$ 之间的关系是

$$N_C = C \times n_s, \quad (6)$$

其中 C 为串扰矩阵, 它是到达的光-电信号与探测得到的光-电信号之间的桥梁,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & k_c & k_s & k_c \\ k_c & 1 & k_c & k_s \\ k_s & k_c & 1 & k_c \\ k_c & k_s & k_c & 1 \end{bmatrix}.$$

因此当串扰存在时, 计算得到的光斑质心与到达的光电子数之间的关系为

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{(N_1 + N_4) - (N_2 + N_3)}{(N_1 + N_2 + N_3 + N_4)} \\ &= \frac{1 - k_s}{1 + 2k_c + k_s} \cdot \frac{n_1 - n_2 - n_3 + n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}, \\ y_c &= \frac{(N_1 + N_2) - (N_3 + N_4)}{(N_1 + N_2 + N_3 + N_4)} \\ &= \frac{1 - k_s}{1 + 2k_c + k_s} \cdot \frac{n_1 + n_2 - n_3 - n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}, \end{aligned} \quad (7)$$

如图 4 所示.

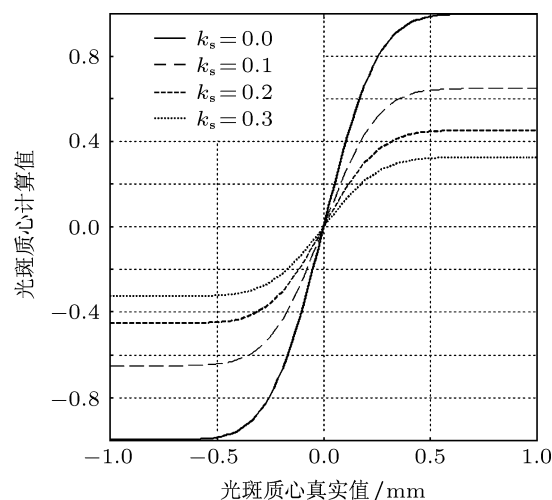


图 4 串扰对光斑质心计算值的影响 $k_c = \sqrt{2}k_s$, $G_s = 0.2 \text{ mm}$, $y_0 = 0$, $w = 1 \text{ mm}$

由于跟踪传感器的光路在 x 方向上和 y 方向上是对称的, 所以以下讨论都集中在 x 方向, y 方向上的情况与此相似.

4 串扰对四象限倾斜跟踪传感器跟踪精度的影响

4.1 串扰对光斑位移灵敏度的影响

定义光斑位移灵敏度 ρ_x 为计算得到的光斑质心位置 x_c 对光斑真实质心位置 x_0 的偏导, 它表示光斑的真实质心位置在不同位置发生微小移动时, 计算得到的光斑质心位置的变化趋势 [7]

$$\rho_x = \partial x_c / \partial x_0. \quad (8)$$

由 (8) 式, (7) 式和 (2) 式可得

$$\begin{aligned} \rho_x &= \frac{1 - k_s}{1 + 2k_c + k_s} \\ &\times \frac{(D_a - D_b) \cdot (D'_a + D'_b) - (D_a + D_b) \cdot (D'_a - D'_b)}{(D_a + D_b)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} D_a &= \text{erf}\left(\frac{\omega - x_0}{\sqrt{2}G_s}\right) + \text{erf}\left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s}\right), \\ D_b &= \text{erf}\left(\frac{\omega + x_0}{\sqrt{2}G_s}\right) - \text{erf}\left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s}\right), \end{aligned}$$

$$D'_a = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}G_s} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\omega - x_0}{\sqrt{2}G_s} \right)^2 \right] - \exp \left[- \left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s} \right)^2 \right],$$

$$D'_b = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}G_s} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x_0}{\sqrt{2}G_s} \right)^2 \right] - \exp \left[- \left(\frac{\omega + x_0}{\sqrt{2}G_s} \right)^2 \right].$$

(9) 式中

$$\frac{(D_a - D_b) \cdot (D'_a + D'_b) - (D_a + D_b) \cdot (D'_a - D'_b)}{(D_a + D_b)^2}$$

是高斯光斑本身的位移灵敏度, $\frac{1 - k_s}{1 + (2\sqrt{2} + 1)k_s}$ 是串扰对光斑位移灵敏度的影响, 显然, 串扰越大, 四象限探测器的光斑位移灵敏度越低, 如图 5 所示.

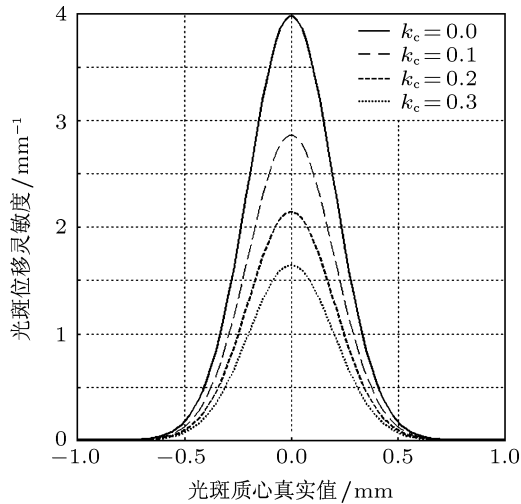


图 5 串扰对光斑位移灵敏度的影响 ($k_c = \sqrt{2}k_s$, $G_s = 0.2 \text{ mm}$, $y_0 = 0$, $\omega = 1 \text{ mm}$)

4.2 串扰对光斑质心探测精度的影响

根据误差理论, 四象限探测器质心探测误差的方差表达式为 [8]

$$\sigma_{xc}^2 = \frac{U_N^2}{V_N^4} \sigma_{V_N}^2 + \frac{1}{V_N^2} \sigma_{U_N}^2 - \frac{2U_N}{V_N^3} \sigma_{U_N V_N}, \quad (10)$$

其中

$$U_N = \sum_{i=1}^4 (e_i \cdot N_i), \quad V_N = \sum_{i=1}^4 N_i,$$

$$\sigma_{U_N}^2 = \sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 + \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^4 (e_i \cdot e_j \cdot \sigma_{ij}),$$

$$\sigma_{V_N}^2 = \sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 + \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^4 \sigma_{ij},$$

$$\sigma_{U_N V_N} = \sum_{i=1}^4 (e_i \cdot \sigma_i^2) + \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^4 (e_i \cdot \sigma_{ij}).$$

$e_1 = 1, e_2 = -1, e_3 = -1, e_4 = 1$, σ_i^2 是第 i 象限输出信号起伏的方差, σ_{ij} 是第 i 象限与第 j 象限输出信号的协方差.

当串扰存在时, 四象限探测器单个象限的输出信号中包含有真实光-电子信号和串扰信号

$$N_i = n_i + \sum_{l=1, l \neq i}^4 (C_{il} n_l). \quad (11)$$

由于串扰信号是由除第 i 象限外的其余象限到达的光-电子数产生的, 所以, n_i 和 $\sum_{l=1, l \neq i}^4 (C_{il} n_l)$ 可以认为是相互独立的, 则第 i 个象限输出信号起伏的方差为

$$\sigma_i^2 = \sigma_{ni}^2 + \sigma_{nc}^2, \quad (12)$$

其中, σ_{ni}^2 是由于光子随机发射引起的, 服从泊松分布. 而单个象限处产生的光-电脉冲的脉冲高度是随机的, 所以能够通过阈值电平耦合电脉冲而产生随机误光子计数的概率可以认为服从泊松分布, 因此, 第 i 象限输出信号起伏的方差为

$$\sigma_i^2 = N_i + \sum_{l=1, l \neq i}^4 (C_{il}^2 \cdot n_l). \quad (13)$$

第 i 象限与第 j 象限输出信号的协方差是由于其相互间的串扰引起的, 所以

$$\sigma_{ij} = \sum_{l=1}^4 (C_{il} \cdot C_{jl} \cdot n_l). \quad (14)$$

将 (13) 式, (14) 式代入 (10) 式, 得四象限探测器质心探测误差的方差为

$$\sigma_{xc}^2 = \frac{1}{V_N} (1 - x_c^2) + \frac{1}{V_N} (v_1 + v_2 x_c^2), \quad (15)$$

其中

$$V_N = (1 + 2k_c + k_s) \cdot E \cdot P_s,$$

$$v_1 = \frac{k_s^2 - 2k_s}{1 + 2k_c + k_s},$$

$$v_2 = \frac{4k_c^2 + 8k_c k_s + 2k_s + 3k_s^2}{1 + 2k_c + k_s}.$$

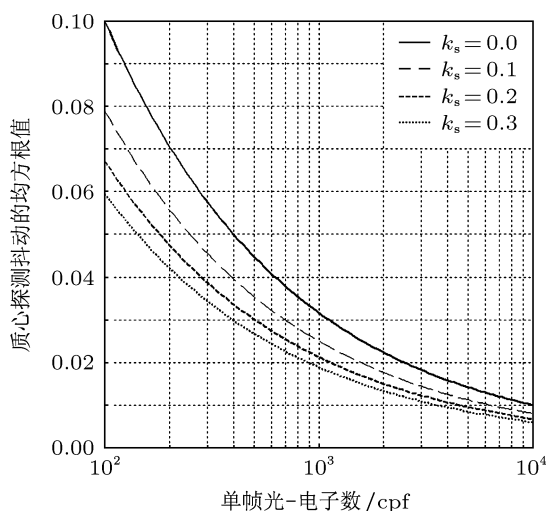


图6 串扰对光斑质心探测误差的影响 ($k_c = \sqrt{2}k_s$, $x_0 = y_0 = 0$)

4.3 串扰对四象限倾斜跟踪传感器跟踪精度的影响

由文献 [7] 可得, 四象限倾斜跟踪传感器的跟踪误差为

$$\sigma_{\alpha_x}^2|_{\alpha_x=0} = \left(\frac{1}{\rho_{x_0}|_{x_0=0} \cdot f} \right)^2 \cdot \sigma_{x_c}^2|_{x_c=0}. \quad (16)$$

由 (9) 式和 (15) 式可得, 当光斑位于四象限探测器的中心时, 位移敏感度和质心探测误差的方差为

$$\rho_{x_0}|_{x_0=0} = \frac{1 - k_s}{1 + 2k_c + k_s} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}G_s},$$

$$\sigma_{x_c}^2|_{x_c=0} = \frac{2k_c - k_s + k_s^2 + 1}{(1 + 2k_c + k_s)^2} \cdot \frac{1}{E \cdot P_s}. \quad (17)$$

所以, 当存在串扰时, 四象限倾斜跟踪传感器的跟踪误差的方差为

$$\sigma_{\alpha_x}^2|_{\alpha_x=0} = \frac{2k_c - k_s + k_s^2 + 1}{(1 - k_s)^2} \times \frac{\pi \cdot G_s^2}{2 \cdot E \cdot P_s \cdot f^2}. \quad (18)$$

由 (18) 式和图 7 可以得到, 四象限探测器的串扰越高, 四象限跟踪传感器的跟踪误差越大。

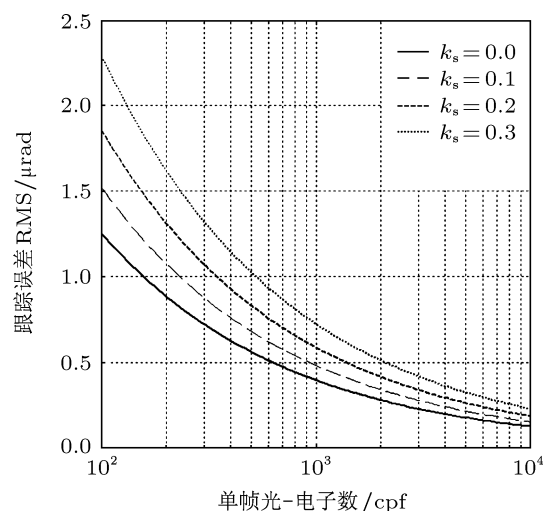


图7 串扰对四象限倾斜跟踪传感器跟踪误差的影响 ($k_c = \sqrt{2}k_s$, $\alpha_x = \alpha_y = 0$, $G_s = 50 \mu\text{m}$, $f = 5 \text{ mm}$)

5 实验结果及分析

实验中采用的四象限探测器是 2×2 的多阳极光电倍增管, 该多阳极光电倍增管的单个象限的宽度是 9 mm, 死区宽度为 0.2 mm。

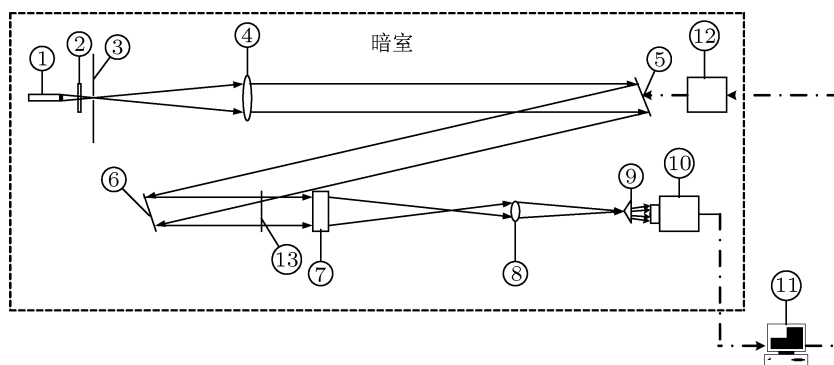


图8 实验框图 (1: 激光器, 2: 可调衰减片, 3: 针孔挡板, 4: 平行光管, 5: 倾斜镜, 6: 反射镜, 7: 长焦透镜, 8: 匹配透镜, 9: 分光四棱锥, 10: 四象限探测器, 11: 计算机, 12: 高压放大器, 13: 入射波前)

实验框图如图 8 所示, 在暗室内, 激光器发出的光经可调衰减片和针孔挡板后形成点光源, 点光源发出的光经平行光管后形成平行光, 平行光经反射镜和倾斜镜反射后通过长焦透镜和匹配透镜后成汇聚光束, 在汇聚光束的焦点处放置一个分光四棱锥用于减少死区对跟踪精度的影响, 四象限探测器输出的光 - 电子信号经传输线传送到暗室外的计算机接收. 在实验中, 通过可调衰减片调整入射波前的光强, 从而改变到达四象限探测器处的光子数; 通过改变施加到倾斜镜上的电压来改变入射波前的倾斜角度, 从而改变四象限探测器处光斑的位置.

5.1 测量串扰系数

在实际应用中, 可以通过改变多阳极光电倍增管光子计数电路的阈值电平来改变象限间的串扰系数, 阈值电平越高, 象限间的串扰系数越小. 但是

当阈值电平增大时, 四象限探测器的光子灵敏度也随之降低.

根据串扰系数的理论, 当光斑落在单个象限上时, 其余象限输出的光子数全是由于串扰产生的, 所以可以通过下式计算串扰系数:

$$k_{ij} = \frac{N_{Aj}}{N_{Ai}}, \quad (19)$$

其中, N_{Ai} 是光斑所在象限输出的光子数的均值, N_{Aj} 是无光斑的象限输出的伪光子数的均值.

图 9 为当光斑位于不同象限时, 四象限探测器输出的光子数.

根据图 9 计算得到的采用该阈值电平的多阳极光电倍增管的串扰系数为 $k_c = 0.4858$, $k_s = 0.3487$ 显然, 由于串扰是由于多阳极光电倍增管的极间电容引起的, 而电容的大小与距离成反比, 所以我们可以发现 $k_c \approx \sqrt{2}k_s$.

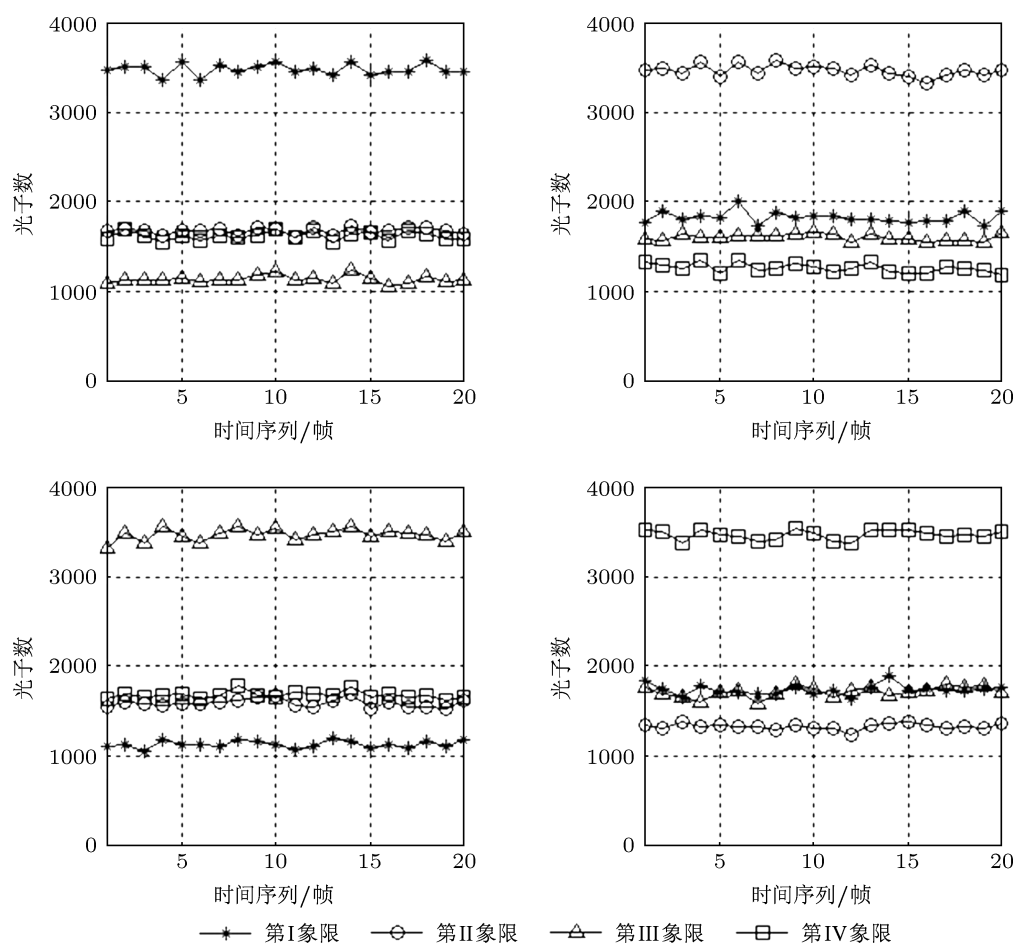


图 9 光斑位于不同象限时各象限的输出光子数

5.2 串扰对光斑质心计算值的影响

利用计算机以 5 帧/秒的速度校正系统的静态像差,使光斑在四棱锥上移动,从而得到串扰对计算得到的光斑质心位置的影响曲线.

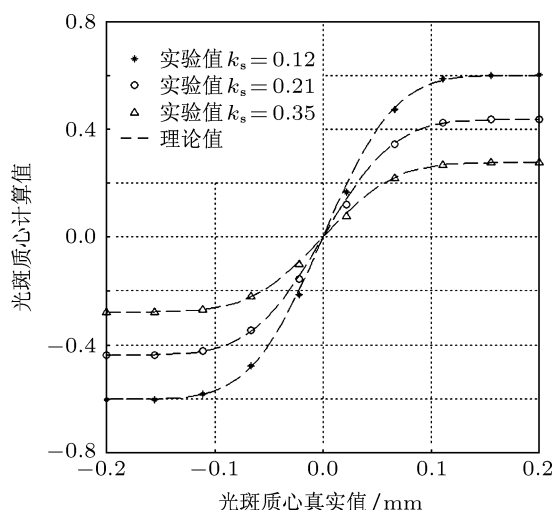


图 10 实验得到的光斑质心位置与光斑真实位置关系曲线 (500 帧平均, $k_c = \sqrt{2}k_s$, $G_s = 52 \mu\text{m}$, $P_s = 1036 \text{ cpf}$)

由图 10 可知,实验值与理论值符合的很好,并且串扰越大,光斑质心曲线越平缓,说明光斑位移灵敏度越低.

5.3 串扰对跟踪精度的影响

利用计算机以 5 帧/秒的速度校正系统的静态像差,使光斑保持在四棱锥的中心;调节可调衰减片控制入射到四象限探测器上的光强,从而得到在不同入射光子数的条件下,串扰对位于原点时光斑质心抖动的影响.实验系统中,光斑的高斯宽度为 $52 \mu\text{m}$,成像透镜的有效焦距为 5.6 m ,此时可以将光斑位于原点时光斑质心的抖动误差转换为跟

踪误差,如图 11 所示.

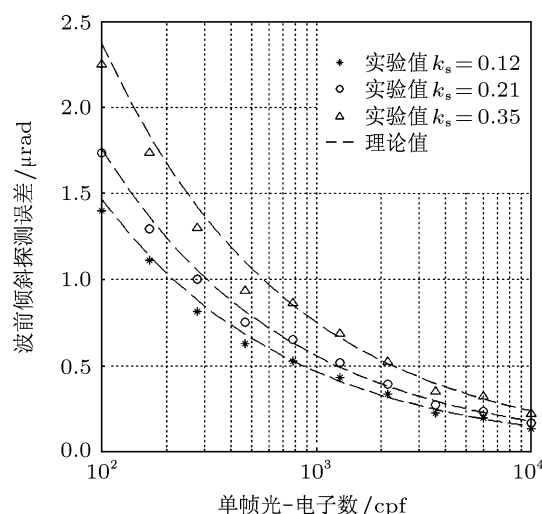


图 11 倾斜跟踪传感器的跟踪误差与单帧光-电子数之间的关系

图 11 证明了串扰越大,倾斜跟踪传感器的探测误差越大,并且与理论值符合得很好.

6 结论

四象限倾斜跟踪传感器的跟踪误差与四象限探测器的质心探测误差和光斑位移敏感度有关.象限间的串扰是随机产生的,并且服从泊松分布,通过分析可以发现,由于光子噪声也服从泊松分布,所以当象限间的串扰一定时,单帧光-电子数越多,四象限倾斜跟踪传感器的跟踪误差越小;而当光子数一定时,象限间的串扰越大,四象限倾斜跟踪传感器的跟踪误差越大.

感谢光电技术研究所魏凌博士对本文在软件上的帮助.

- [1] Rao C H, Zhang X J, Jiang W H, Tang G M 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 67 (in Chinese) [饶长辉, 张学军, 姜文汉, 汤国茂 2002 光学学报 **22** 67]
- [2] Tyler G A, Fried D L 1982 *J. Opt. Soc. Am.* **72** 804
- [3] Golimowski D A, Clampin M, Durrance S T, Barkhouser R H 1992 *Appl. Opt.* **31** 4405
- [4] Hayano Y, Takami H, Gaessler W, Takato N, Goto M, Kamata Y,

Minowa Y, Kobayashi N, Iye M 2003 *SPIE* **4839** 32

- [5] Rome M, Fleck H G, and Hines D C 1964 *Appl. Opt.* **3** 691
- [6] Toyoda M, Araki K, Suzuki Y 2002 *Appl. Opt.* **41** 2219
- [7] Ma X Y, Mu J, Rao C H, *Acta Phys. Sin.* 2012 **61** 072903 (in Chinese) [马晓燮, 母杰, 饶长辉 物理学报 **61** 072903]
- [8] Ma X Y, Rao C H, Zheng H Q 2009 *Opt. Exp.* **17** 8525

Error analysis of four-quadrant-based tracking sensor for inevitable crosstalk in multiple anode photomultiplier tube

Ma Xiao-Yu¹⁾²⁾ Guo You-Ming¹⁾²⁾³⁾ Rao Chang-Hui^{1)2)†}
Wei Kai¹⁾²⁾ Tian Yu¹⁾²⁾ Rao Xue-Jun¹⁾²⁾

1) (*The laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

2) (*The Key laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

3) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 15 June 2012; revised manuscript received 7 July 2012)

Abstract

Based on the basic principle of four-quadrant-based tracking sensor, the centroid detection error and the displacement sensitivity of four-quadrant detector, caused by noise or crosstalk in multiple anode photomultiplier (PMT tube), are analyzed in detail. The tracking error formula of four-quadrant-based tracking sensor is given in theory and verified in experiment. The results show that when the photon-electron number per frame is constant, the tracking error of four-quadrant-based tracking sensor increases as the crosstalk in multiple-anode PMT increases, and when the crosstalk in multiple-anode PMT is constant, the tracking error of four-quadrant-based tracking sensor decreases as the photon-electron numbers increases.

Keywords: optical engineering, tracking sensor, four-quadrant detector, tracking error

PACS: 29.40.Gx, 06.60.Sx, 42.15.Eq

† E-mail: chrao@ioe.ac.cn